高放废液贮存厂房的系统与布置设计

蒋斌 [1]　张允宁 [2]
1（中国核电工程有限公司　北京市 100840）
2（中国核电工程有限公司　北京市 100840）

摘要　高放废液贮存厂房是乏燃料后处理厂中必不可少的重要设施，其稳定运行关系到整个厂区的生产安全。文章依据设计标准并结合工程实践，阐述了高放废液贮存厂房的工艺系统设计，包括高放废液贮存及输送系统、循环冷却水系统、高放废液搅拌系统、工艺尾气处理及贮槽稀释空气系统等等。以实际工程项目为例，介绍了高放废液贮存厂房的整体布置形式、工艺设备及管道的布置特点，可为后续高放废液贮存厂房的设计及其他核化工项目的设计工作提供借鉴和参考。

关键词　高放废液贮存厂房；工艺系统设计；厂房布置设计
中图分类号　TL99（建议原子能技术类的中图分类号）
DOI:

Process system and layout design of high level radioactive liquid waste storage building

Jiang Bin [1]　Zhang Yunning [2]
1(*China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China*)
2(*China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Beijing 100840, China*)

Abstract The high level radioactive liquid waste (HLLW) storage building is an essential facility in the spent fuel reprocessing plant. and its stable operation is related to the production safety of the entire plant area. This article elaborates on the process system design of HLLW storage building based on design standards and engineering practice. including the HLLW storage and transportation system. circulating cooling water system. HLLW mixing system. dilution air and exhaust treatment system of the liquid waste storage tank. and so on. The overall layout form. process equipment and pipeline layout characteristics of HLLW storage building are introduced with the example of the actual project. Reference can be provided for designing of HLLW storage building and other nuclear chemical projects in the future.

Key words　High level radioactive liquid waste storage building, Process system design, Plant layout design

随着国家碳中和战略的实施，我国能源结构也在逐步调整，核电作为国际公认的高效清洁能源，其能源结构的占比越来越大。我国采取的是核燃料闭式循环方针，通过乏燃料后处理回收在反应堆中未充分利用的核燃料物质。

乏燃料后处理工艺过程中会产生高放废液，其本质是铀钚萃取循环过程中产生的萃余水相浓缩液，其中除了微量的铀、钚元素之外，几乎所有裂变产物、镎及超钚元素都富集在高放废液之中[1]。因此，高放废液具有放射性强、毒性大、半衰期长、发热率高、腐蚀性强等特性。工艺系统及厂房设计是工程设计过程的核心环节也是保证核安全重要基础。

第一作者：蒋斌，男，1987 年出生，2014 年于北京化工大学获硕士学位，从事核化工科研及工程设计工作
通讯作者：蒋斌，E-mail: jiang4574@126.com
收稿日期：20XX-00-00，修回日期：20XX-00-00

1 工艺系统设计

高放废液贮存厂房的设计应严格遵守 GB 11929《高水平放射性废液贮存厂房设计规定》的各项条款，依据标准规定，工艺系统一般应包括：废液贮存及输送系统、循环冷却水系统、废液搅拌系统、废液贮槽稀释空气及排气处理系统及其他辅助系统[2]。

1.1 高放废液贮存及输送系统

废液贮存及输送系统的主要功能是接收上游厂房输出的高放废液并安全贮存，根据生产安排，将贮存的废液输送到最终的处理设施进行固化处理。

高放废液贮槽是废液贮存及输送系统的核心设备，其形状一般为平底平盖的圆柱形的钢罐，贮存容量从 50m^3 到 1200m^3 不等[3]，具体的容量及贮槽数量可根据工程具体情况确定，需要注意的是高放废液贮槽必须配置备用贮槽，且至少应保证 4 个贮槽中有 1 个备用槽[4]。

高放废液贮槽的设计需要匹配高放废液的各项特性，为防止废液腐蚀罐体造成泄露，贮槽本体及其内构件一般选取耐腐蚀的不锈钢材质，且需要根据储存年限设置适当的腐蚀裕度；高放废液贮槽的设计不仅需要满足设备本身的结构强度需要，还应满足抗震要求，设置必要的结构加强措施。

高放废液具有自释热的特性，如无外部冷却措施，热量积累会造成贮槽内废液的沸腾现象，给厂房的安全运行造成严重危害。高放废液的冷却一般采用若干组沉浸式蛇管换热器，通过循环冷却水将高放废液释放的热量带走，使高放废液维持在适宜的温度范围内。高放废液的强放射性，可使水和硝酸发生辐解产生氢气，易燃易爆气体叠加强放射性物料，会给厂房的安全运行造成巨大风险，因此必须及时稀释和排出产生的氢气。正常运行时，一般通过贮槽的尾气系统调节使贮槽内保持一定程度的负压状态，使产生的氢气可以及时被排出避免积聚。

高放废液是蒸发浓缩后的强放射性废水，含盐量高且含有不溶性固体颗粒，为了避免固体物质在贮槽内沉积板结产生热点而加速腐蚀罐体，运行期间需要对槽内的废液进行持续搅拌，目前工程中一般采用空气升液循环器和气镇器进行液体搅拌，两者都是通过压缩空气提供动力实现液体搅拌，适于强放射性环境中设备免维修的需求，且搅拌液体的空气也可以起到稀释贮槽内氢气的作用。

放射性料液的输送设备有多种类型可供选择，高放废液的输送多选用蒸汽喷射泵和扬液器两种流体输送设备。两者皆是没有机械传动部件的免维修输送设备，通过气体（蒸汽或压空）提供动力以实现液体输送。蒸汽喷射泵结构简单、运行可靠，但是输送效率较低，可实现的输送流量和扬程都不大，且输送过程中会造成废液的稀释，较为适宜近距离的批量废液输送。扬液器实质是一个压力储罐，运行时先通过负压将废液吸入罐内，再通入压缩空气，将废液正压排出，可实现较高的输送压头，但是扬液器系统需要的控制阀门较多，系统相对复杂，且放射性物料的罐体内应尽量避免正压，尤其是强放射性物料的储罐，正压工况的风险相对较大，因此，扬液器多作为备用输送方式，在蒸汽喷射泵失效或应急状态下作为废液输送手段。

1.2 循环冷却水系统

循环冷却水系统的主要功能是将高放废液的衰变热导出，使废液的温度维持在合理的范围内。循环冷却水系统设置了两个回路，一回路是工艺系统的冷却水循环回路，二回路是公用工程系统提供的冷却回路，如图 1 所示，一回路除了为高放废液贮存系统提供冷却水，也为尾气处理系统提供冷量，用于工艺尾气的冷凝除水。双回路设置既可以节约用水量，也可以防止放射性污染扩散。当一回路的循环水泵出现故障或二回路公用工程出现故障时，使用厂区的生产水进行冷却，为了应对极端情况还需设置应急水源，以保证贮槽内的废液冷却不中断。

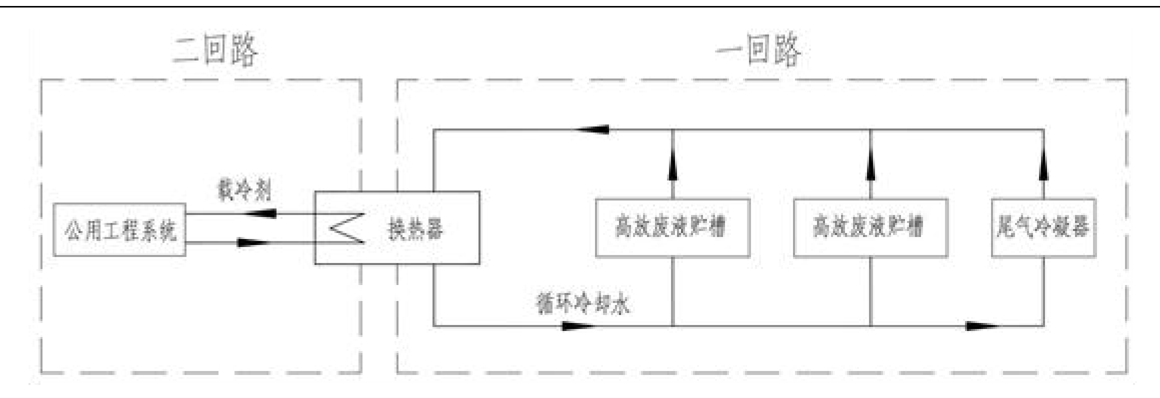


图 1 高放废液循环冷却水系统示意图

Fig.1 Circulating cooling water system

1.3 高放废液搅拌系统

如前所述，高放废液含盐量高且含有不溶性固体颗粒，需要在贮槽内设置空气升液循环器和气镇器进行废液搅拌。两种搅拌设备均是采用压缩空气提供搅拌动力的免维修设备。空气升液循环器是利用压缩空气形成的气泡带动液体在垂直方向实现循环流动，压缩空气从进气管底部的小孔喷出，气泡带动升液器内部的液体向上流动，外部的液体从升液器底部补充进入升液器，形成竖向循环[5]，如图 2 所示。气镇器是利用压缩空气作用于气镇器内部的液体，形成带压射流由气镇器底部喷嘴高速射出并作用于贮槽内部及槽底，可使沉降于底部的沉积物泛起，达到搅拌的作用[6]，如图 3 所示，气镇器排出的高速射流撞击贮槽底部后，形成水平方向的液体流动。实际工程中，可根据贮槽情况设置多组气镇器并配合若干空气升液循环器进行废液搅拌。

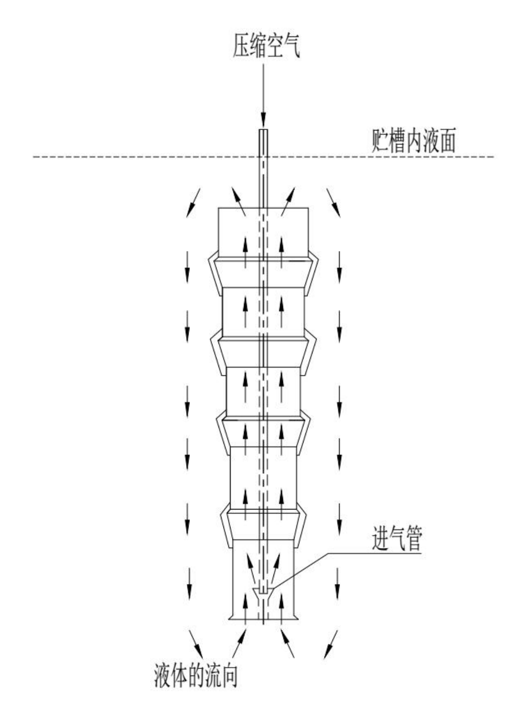


图 2 空气升液循环器示意图

Fig.2 Air lift circulator

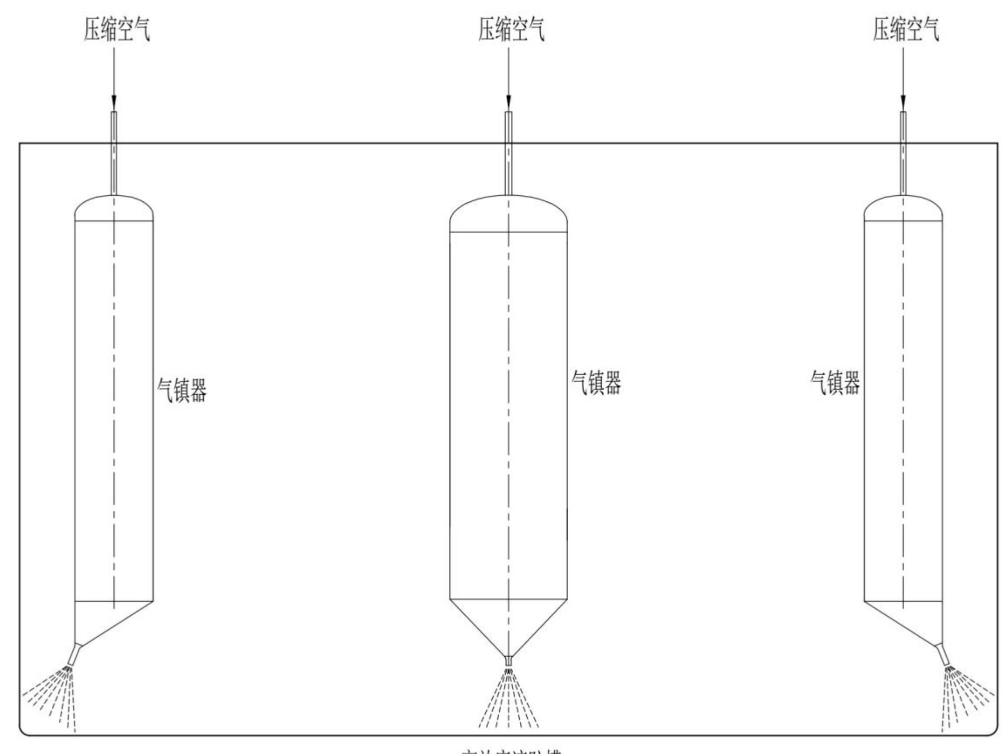


图 3 气镇器示意图

Fig.3 Jet ballast in HLLW storage tank

1.4 工艺尾气处理系统及其他辅助系统

贮槽的排气系统通常称为工艺尾气处理系统，其主要功能是维持贮槽内的压力平衡并及时排出高放废液辐解产生的氢气，更重要的是对放射性气体进行净化处理，使其达到环保排放要求。该系统须连续保持连续运行状态，通常设置多重或冗余设备以保证各种状态下的系统运行不间断。

工艺尾气的处理流程通常会根据不同项目的特点选取不同的设备或采取不同的流程，不过通常都会先除去尾气夹带的水分，一般采用冷凝和离心的方式将水分除去，这些水分的放射性较高，需要妥善收集并将其返回高放废液贮槽。尾气除水后，其放射性大幅下降，将尾气预热到适宜的温度后进行过滤和吸附处理，可采用数级过滤器吸附除去尾气夹带的放射性核素，使尾气达到排放标准。

高放废液的贮槽稀释空气系统的主要功能是在应急状态下，通过备用的压空来源，向贮槽内吹气，以保证贮槽内的氢气含量始终低于爆炸下限。一般工况下，贮槽内压空搅拌的气量足以稀释废液辐解的氢气，不过为了应对各种工况，仍需要设置备用的压空稀释系统。

其他辅助系统包括稀酸补充系统、工艺试剂系统、取样系统等等，一般可根据具体的项目需求进行设置。

2 厂房布置设计

2.1 布置原则

高放废液贮存厂房及其他放射性生产厂房的布置设计原则与普通工业厂房的布置设计原则有很多相似之处，不过其最大的特点是需要贯彻分区布置原则和纵深防御原则。

（1）分区布置

分区布置是根据工作场所的放射性水平进行分区，根据 GB 18871 的规定，将厂房的工作场所分为控制区和监督区。厂房的监督区为非放射性工作区，也称为白区，厂房的白区房间一般作为控制室或公用工

程系统用房。

厂房的控制区为放射性工作区，根据其辐射水平和可能的污染程度由低到高再细分为绿区、橙区、红区三个子区。绿区房间一般作为工艺操作用房或辅助系统用房。橙区房间主要作为工艺设备布置用房和放射性设备检修区。红区房间内直接贮存或处理大量的放射性物料，正常运行时不允许任何人员进入。

厂房布置设计过程中，应根据工艺流程及物料放射性水平，对工艺设备和房间进行分区集中布置，根据放射性水平的差异将设备及管道布置在相应的分区内；相同分区的房间应尽量集中排布。不同的辐射分区之间设置必要的过渡性房间和进出口控制措施，以避免人流或物流的交叉污染。

（2）纵深防御

根据高放废液贮存厂房的设计标准，厂房布置设计必须体现纵深防御的原则，所谓的纵深防御，即是通过设置多重的实体封闭屏障将放射性物料包容在预定的范围之内，避免放射性物质的无序扩散造成不可控的放射性污染。在高放废液贮存厂房的设计中，多重实体屏障体现为贮槽和管道系统、红区设备室不锈钢覆面、混凝土屏蔽墙体以及厂房通风系统。

工艺贮槽和管道直接包容放射性物料，作为第一道实体屏障；当管道、贮槽损坏或泄露时，带有不锈钢内衬的设备室或箱室可作为第二道屏障对放射性物料进行滞留和密封。厂房建筑物作为第三重实体屏障，将放射性物料与外部环境隔离开。

厂房的通排风系统对房间内产生的气载放射性物质进行封闭、导向、控制和净化，通过对气流和房间负压的控制，防止污染随空气无序弥散[7]。厂房的通风气流控制通常是使其由低水平放射性区域流向较高水平放射性区域，为了控制气流方向，需在不同的区域之间设置适当的压力梯度。

2.2 厂房布置

厂房布置设计不仅仅是将工艺设备摆放在厂房的各个房间内，其核心是围绕工艺流程的实现，进行人流及物流走向设计，厂房投运后应保证工艺功能可实现，人流合理、物流顺畅。

以某技术方案为例，根据工艺要求，厂房内设置四个高放废液贮槽并配套建设相关辅助系统。

根据厂区的配套设施位置和总体的放射性物料走向，将此厂房的公用工程、辅助系统等白区房间集中布置于厂房的北侧区域；控制区房间集中布置于厂房的南侧区域，为了避免不同分区的交叉污染，采用实体墙壁进行隔离。高放废液贮存系统及工艺尾气处理系统房间的放射性水平较高，将其全部设置于厂房地下部分。对于本厂房，其地下部分的布置是最能表现厂房设计特点，如图 3-1 和图 3-2 所示，高放废液贮槽和废液输送系统的红区设备室集中布置在地下的西侧区域，尾气系统紧邻高放废液贮存系统，根据工艺流程顺序由西向东进行排布，围绕地下部分的工艺系统房间排布了通风系统用房及辅助系统用房。根据厂区排水方向，在地下的东侧区域设置厂房排水系统。

综上，根据放射性水平的差异，厂房大体分为南北两个区域，北侧非放射性区域，南侧为放射性生产区域，放射性生产区域内，根据放射性水平由高到低，将工艺和辅助专业用房由西向东进行排布。

厂房的地上部分房间排布与地下大致相对应，厂房北侧区域为白区房间，南侧为控制区用房，不过地上部分排布的是放射性较低的工艺设备和检修用房。通过上述的布置设计，实现了该厂房的非放区域和放射性区域的隔离，放射性水平较高部分和放射性水平较低部分的分区及梯次布置，使厂房整体呈现较为理想的区域化、模块化的布局状态，不同区域的人流和物流可从各自区域的通道进出即可，厂房路线顺畅且互不影响和交叉。由此可见，合理的技术方案可实现地上与地下分隔、南北分区、东西梯次布置，人流、物流组织顺畅。

上述高放废液贮存厂房及其他放射性产品或废物贮存库等设施，其工艺系统的组成较为简单，运行操作较少，厂房整体容易实现分区模块化布置。但大多数核化厂房的工艺系统组成较为复杂，生产操作需求较多。虽然可将监督区和控制区分隔布置，但控制区内不同分区房间的交叉分布较为普遍。在开展厂房布置设计时，可采取“洋葱式”布置形式，将放射性水平较高的红区房间置于一个区域的中心位置或厂房一侧，根据工艺功能围绕着红区房间逐层的排布橙区房间和绿区房间，如此形成区域化和模块化布局；如果厂房内有多个“洋葱式”组团区域，通常将这些区域根据工艺流程顺序或操作需要进行顺序式布置或镜像对称形式的布置。

总之，核化厂房布置设计并不拘泥于某一形式，实际工程中，应根据厂区客观条件、工艺流程及设备

选型等因素灵活应变，但任何技术方案都须满足工艺安全和辐射安全的要求。

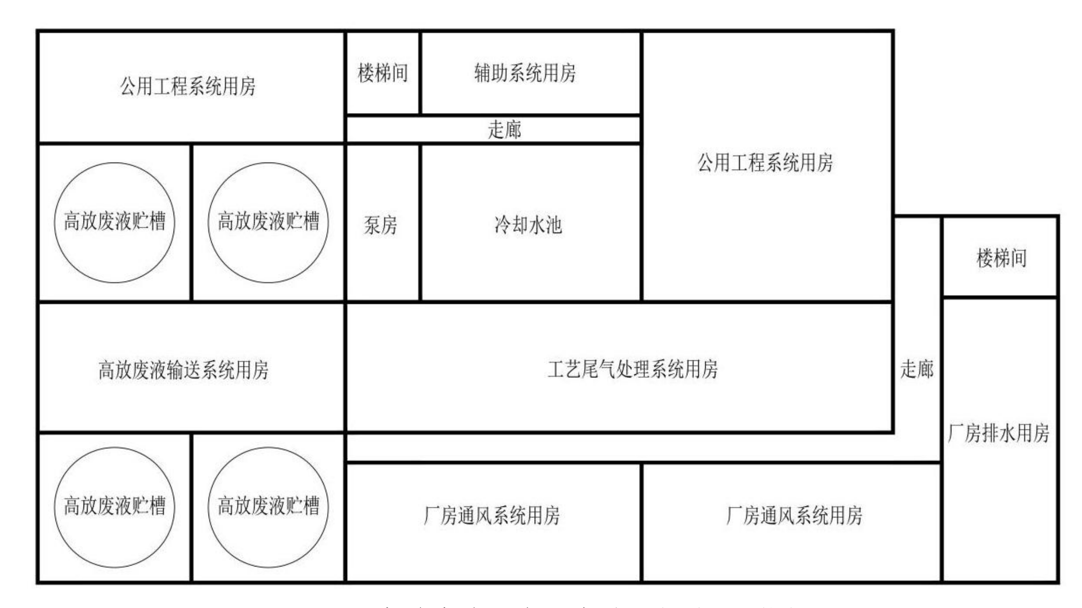


图 4 高放废液贮存厂房地下部分平面图

Fig.4 Ground floor plan of HLLW storage building



图 5 高放废液贮存厂房剖面图

Fig.5 Section plan of HLLW storage building

3 工艺设备及管道布置设计

化工厂的设备布置设计，通常追求最大限度的露天布置，以期节约建设投资、加快建设进度，并有利于防火防爆设计。而高放废液贮存及其他核化厂房的工艺设备一般都布置于室内进行隔离和屏蔽，以防止工艺设备或管道包容的放射性物料对人员造成伤害或污染环境。不过，有些盛装非放物料的设备和管道，如放射性废液水泥固化处理厂房的水泥粉料仓可布置在室外，一来便于料仓接收水泥粉料，二是水泥粉料储量较大且适合露天布置。厂房运行时，水泥粉料通过气力输送由室外料仓送进厂房内的小型中间储罐备用即可。

长期贮存大量放射性废液的槽罐需单独布置于厂房地下的设备室内，临时贮存少量废液的中间罐或缓冲罐等，可根据工艺流程和厂房形式等灵活布置。核化厂房内的普通换热器、离心泵、风机等常规设备的布置设计可参照一般化工设备布置的标准规范及通用做法，在满足工艺流程要求的基础上考虑安装、检修等因素开展布置设计。

核化厂房内工艺管道根据其输送的物料性质进行布置，放射物料管道集中布置于红区设备室内，输送非放物料的工艺管道可根据设计需要布置于橙区、绿区或白区内，管道的具体排布形式，如净空、净距等一般都可参考普通工业管道的做法进行设计。

4 结语

高放废液贮存厂房或是其他核化厂房工艺系统组成、厂房形式、工艺设备及管道布置，都是在充分理解处理物料的物理、化学性质及反应原理的基础上，根据特定的生产工艺和目标进行设计的。随着工业技术的进步，新工艺、新材料的不断涌现，核化工设计也应紧跟新时代的发展趋势，博采众长，实现更高质量发展。

作者贡献说明 蒋斌为本文第一作者及全文主要编纂者。张允宁为本文第二作者，对本文进行了补充和修改。

参考文献

1 周贤玉.核燃料后处理工程[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社,2009:227.
2 GB 11929-2011 高水平放射性废液贮存厂房设计规定[S].
3 罗文宗.高放废液贮槽的设计、建造和检验[J]. 原子能科学与技术,1993,27(5):468-473.
4 EJ/T 940-95 核燃料后处理厂放射性废物管理技术规定[S].
5 逯迎春.空气升液循环器在高放废液贮槽中的应用[J]. 产业与科技论坛,2018,17（11）:85-86.
6 逯迎春.高放废液贮槽气镇器搅拌系统的数值模拟研究[J]. 原子能科学技术,2012,46（增刊）:184-187.
7 蒋斌.核化工厂房布置设计概述[J]. 广东化工,2022,49（6）:175-176.